

复合型工艺风险评估模型的研究及其现场应用

姚锡文¹, 许开立¹, 闫放¹, 汤规成^{1,2}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国石油辽河石化公司, 辽宁 盘锦 124002)

摘 要: 充分考虑石化装置的复杂工艺特点,建立了基于贝叶斯网络的危险与可操作性研究(HAZOP)、保护层分析(LOPA)、领结分析(Bow-Tie分析)于一体的复合型工艺风险评估模型。首先编制系统故障树,将其映射成对应贝叶斯网络,利用GeNIe软件实现贝叶斯双向推理进行故障预测和诊断,找出最容易导致事故的风险贝叶斯故障节点;然后运用HAZOP-LOPA集成分析研究该节点参数出现偏差的原因及后果,通过独立保护层失效概率评估风险等级;最后对剩余风险等级较高的事件进行Bow-Tie分析,辨识出使保护层持续有效的关键活动,进而控制后果严重的工艺安全事故。以辽河石化公司的延迟焦化装置为例对该风险评估模型进行了现场应用。

关 键 词: 贝叶斯网络;风险评估模型;故障树;保护层分析;领结分析;延迟焦化

中图分类号: X 937

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)05-0737-06

Research on the Risk Evaluation Model for Composite Techniques and Its Field Application

YAO Xi-wen¹, XU Kai-li¹, YAN Fang¹, TANG Gui-cheng^{1,2}

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaohe Petrochemical Company of China Petroleum, Panjin 124002, China. Corresponding author: YAO Xi-wen, E-mail: yxw_20061005@126.com)

Abstract: Taking into full account the complex process of a petrochemical plant, a risk evaluation model based on Bayesian networks for composite techniques was built, which integrates HAZOP, LOPA and Bow-tie analysis. Firstly, the system fault tree was prepared, which was mapped into corresponding Bayesian networks, and the GeNIe software was utilized for fault prediction and diagnosis with the two-way reasoning of Bayesian networks and for locating the Bayesian risk fault node which most likely leads to accidents. Secondly, the causes and consequences of deviation occurring in the node parameters were studied by combining HAZOP and LOPA, and the risk level was confirmed through the failure probability of identified protection layers. Lastly, Bow-Tie analysis was applied to the remaining higher risk events for identifying the key activities to continuously sustain IPL effectively and then preventing the serious technique safety accidents from happening. Moreover, this risk evaluation model was put into use in the delayed coking device of Liaohe Petrochemical Company.

Key words: Bayesian network; risk evaluation model; fault tree; LOPA; Bow-Tie analysis; delayed coking

随着石油化工行业的发展,石化生产工艺越来越复杂,装置自动化程度越来越高,工艺过程操作条件更加苛刻,只要某一部位或某一环节发生故障或操作失误,就可能导致火灾、爆炸、中毒等

重大事故的发生,给人们的生产和生活带来了极大威胁。这就对石化装置复杂工艺信息模糊条件下的定量风险评价提出了更高要求。

贝叶斯网络(Bayesian network, BN)能够很

好地表示变量的随机性和相关性,进行不确定性推理.例如,Ren 等^[1]将 BN 应用于海上设施的风险分析;Weber 等^[2]对 BN 在可靠性分析和维护领域的应用进行了研究;Brooker^[3]利用 BN 研究了航空风险评估问题;周建方等^[4]通过实例说明 BN 在大坝风险分析中的应用;汪涛等^[5]提出一种基于 BN 的施工安全风险评估方法;然而贝叶斯网络推理技术在石化装置火灾、爆炸事故的风险评估中未见相关报道.笔者提出了基于贝叶斯网络(Bayesian network)的危险性与可操作性研究(HAZOP)、保护层分析(LOPA)、领结分析(Bow-Tie 分析)于一体的复合型工艺风险评估模型,并以辽河石化公司的延迟焦化装置为例,对该模型的现场应用进行了详细说明.

1 复合型工艺风险评估理论概述

1.1 贝叶斯网络的推理问题

贝叶斯网络是 Pearl^[6]提出的一种简洁有效的因果关系表达和推理决策方法,是根据贝叶斯推理建立的各个变量之间依赖关系的概率图模型.贝叶斯网络理论基础是著名的贝叶斯公式:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}. \quad (1)$$

其中: $P(A)$ 是先验概率; $P(A|B)$ 是后验概率; $P(B|A)$ 是似然率.如果 A 是一个变量,有 a_1, a_2, \dots, a_n 个状态,由全概率公式,有 $P(B) = \sum P(B|a_i)P(a_i)$,从而算出后验概率 $P(A|B)$.

贝叶斯网络能很好地表示变量的随机不确定性和相关性,不但能进行前向推理,由原因导出结果,更重要的是可以进行后向推理,从后验概率到先验概率的推理过程,即由结果推出原因的过程.

1.2 HAZOP-LOPA 集成风险分析

HAZOP 分析是用于辨识工艺缺陷、工艺过程危险及操作性问题的定性分析方法.对识别出的危险所导致的事故后果进行定性评估,若事故后果等级较高,则需要进行 LOPA 研究. LOPA 是一种半定量的风险分析方法,一定意义上是将 HAZOP 得出的事故后果半定量化^[7-8].

表 1 是典型的半定量风险矩阵.事故后果严重程度分为 5 个等级,事故发生概率等级见表 2,每一对后果严重程度和事故发生概率对应一个风险级别,每个风险级别有对应的建议措施见表 3.

表 1 半定量风险矩阵
Table 1 Semi-quantitative risk matrix

后果严重度		事故发生频率				
		1	2	3	4	5
1	低	1	2	3	4	5
2	较低	2	4	6	8	10
3	中	3	6	9	12	15
4	高	4	8	12	16	20
5	较高	5	10	15	20	25

表 2 事故发生频率划分表
Table 2 Accident frequency levels

频率等级	可能性	事件频率	年发生次数
1	很不可能	$< 10^{-5}$	大于百万年一次
2	不可能	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	万年到百万年一次
3	可能	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	百年到万年一次
4	很可能	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	十年到百年一次
5	极有可能	$> 10^{-1}$	小于十年一次

表 3 风险等级及对应措施
Table 3 Risk levels and required measures

风险等级	描述
1~4	无需采取安全措施
5~8	在条件允许时应采取安全措施
9~12	计划内采取安全措施
15~25	立即采取安全措施

注:表中各项数据来源于参考文献[9].

1.3 领结分析(Bow-Tie 分析)

领结分析也称蝴蝶结模型,是一种集故障树、事件树相结合的复合型工序风险评估技术,这种方法将基本事件、中间事件、顶上事件、预防控制措施、减缓控制措施和事故后果之间的关联以领结的形状绘制出来^[9-10],领结分析模型如图 1 所示.该模型兼具了故障树分析与事件树分析的优点,对复杂装置的工艺危险控制与安全评估都具有很好的适用性与操作性.

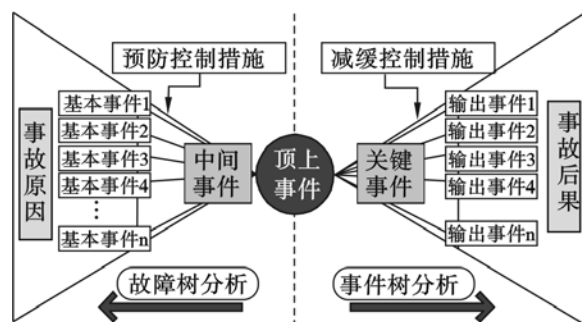


图 1 领结分析模型

Fig. 1 Bow-Tie analysis model

2 复合型工艺风险评估模型步骤

基于贝叶斯推理的 HAZOP-LOPA-Bow-Tie 复合型工艺风险评估模型的主要步骤如下:

①编制系统故障树,将其映射成对应贝叶斯网络,构建条件概率表,利用 GeNIe 软件实现贝叶斯双向推理研究各基本事件的后验概率,快速识别系统的薄弱环节。

②根据计算结果进行预测和诊断,找出最容易导致装置发生事故的原因事件,然后选择该基本事件为风险贝叶斯故障节点。

③通过 HAZOP-LOPA 集成分析对该风险贝叶斯故障节点进行全面分析,研究重大事故场景的全过程,明确识别出初始、中间和后果事件。

④确定该风险贝叶斯故障节点包含的各项参数出现偏差的原因及后果,根据半定量风险矩阵确定风险等级,然后设置相应的独立防护层措施。

⑤利用 LOPA 中的独立保护层 (IPL) 失效概率来评估剩余风险等级,比较被评价的防护层故障频率与允许的防护层故障频率,研究防护层措施是否已将剩余风险降到可接受的程度。

⑥利用 Bow-Tie 分析对剩余风险等级仍然较高的事件进行研究,辨识出使保护层持续有效的关键活动,进而控制后果严重的工艺安全事故。

3 复合型工艺风险评估模型实例

3.1 延迟焦化装置工艺简介

辽河石化公司 100 万吨/年延迟焦化装置采用一炉两塔、单井架水力除焦,工艺流程见图 2。

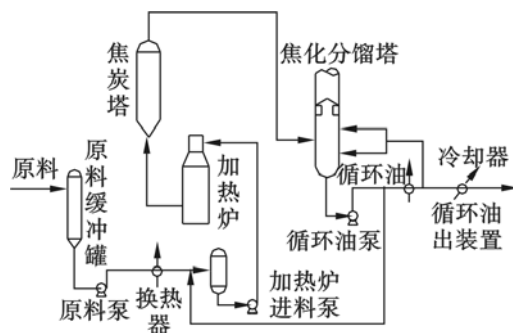


图2 延迟焦化工艺流程图

Fig. 2 Technique flow chart of delay coking

原料油换热后进入分馏塔下部,与来自焦炭塔的高温油气换热。原料油和循环油一起被送至加热炉加热到 500℃ 左右进入焦炭塔底部。热的原料油在焦炭塔内进行裂解、缩合等反应生成焦

炭。反应油气自焦炭塔顶部逸出,进入分馏塔,得到焦化气、汽油、柴油、循环油等。

以延迟焦化装置加热炉火灾、爆炸事故为例说明贝叶斯网络推理下的 HAZOP-LOPA-Bow-Tie 复合型工艺风险评估模型的应用。

3.2 加热炉火灾、爆炸故障树与贝叶斯网络

根据延迟焦化工艺流程编制加热炉火灾、爆炸故障树如图 3 所示,将故障树转化为贝叶斯网络见图 4,应用 GeNIe 软件实现贝叶斯网络的推理过程。

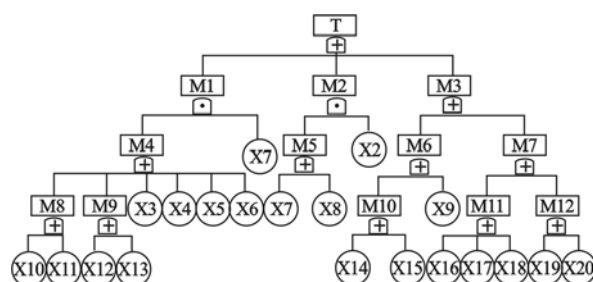


图3 加热炉火灾、爆炸故障树图

Fig. 3 Fault tree of heating furnace fire and explosion accident

代号说明:

M₁: 加热炉回火爆炸
M₂: 加热炉负压燃烧爆炸
M₃: 炉管破裂
M₄: 残余可燃气体
M₅: 高压空气串入炉膛
M₆: 炉管腐蚀
M₇: 管道内有残余可燃气体
M₈: 管内结灰
M₉: 管内无介质
M₁₀: 管内结灰
M₁₁: 管内无介质
M₁₂: 火焰扑在炉管上
X₁: 炉温 ≥ 600℃
X₂: 泄爆门失效
X₃: 点火前排风不完全
X₄: 可燃气体瞬间高温
X₅: 系统联锁失效
X₆: 助燃空气过压
X₇: 阀门维护不好
X₈: 阀门关不严
X₉: 内壁结焦
X₁₀: 可燃气管吹扫不彻底
X₁₁: 燃烧气分液罐内漏
X₁₂: 瓦斯带液
X₁₃: 调节阀故障
X₁₄: 吹灰不完全
X₁₅: 吹灰器坏
X₁₆: 进料泵停运
X₁₇: 过滤器堵塞
X₁₈: 联锁仪表失灵
X₁₉: 泄压失败
X₂₀: 火焰发散

T: 加热炉火灾、爆炸

M₂: 加热炉负压燃烧爆炸
M₄: 残余可燃气体
M₆: 炉管腐蚀
M₈: 管道内有残余可燃气体
M₁₀: 管内结灰
M₁₂: 火焰扑在炉管上
X₂: 泄爆门失效
X₄: 可燃气体瞬间高温
X₆: 助燃空气过压
X₈: 阀门关不严
X₁₀: 可燃气管吹扫不彻底
X₁₂: 瓦斯带液
X₁₄: 吹灰不完全
X₁₆: 进料泵停运
X₁₈: 联锁仪表失灵
X₂₀: 火焰发散

根据 BN 根节点的先验频率将贝叶斯网络中的节点数据全部更新后诊断系统故障条件下各个组件的后验频率。由于篇幅所限,各基本事件的后验频率统一列于表 4 中。其中,基本事件的后验频率由相关企业统计资料确定。由表 4 的后验频率可知,后果出现很可能是 X₄ 可燃气体瞬间高温、X₉ 内壁结焦、X₁₄ 吹灰不完全、X₁₈ 连锁仪表失灵、X₁₉ 泄压失败等故障引起。

3.3 HAZOP-LOPA 集成风险分析

由加热炉火灾爆炸贝叶斯网络的后验概率知,基本事件 X₉: 内壁结焦导致加热炉火灾、爆炸事故的概率偏高,则选取 X₉ 内壁结焦作为贝叶

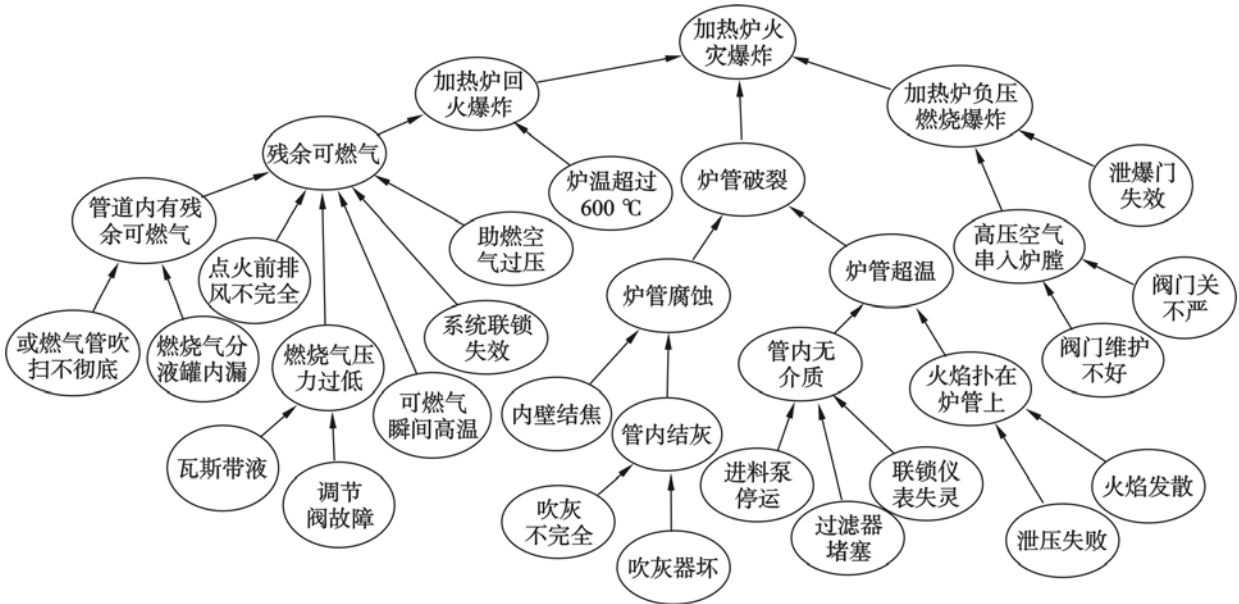


图 4 加热炉火灾、爆炸事故贝叶斯网络
Fig. 4 BN of heating furnace fire and explosion accident

表 4 加热炉贝叶斯网络的先验概率和后验概率
Table 4 Priori and posteriori probability of heating furnace BN

事件	先验概率	后验概率	事件	先验概率	后验概率
X ₁	3.75 × 10 ⁻⁵	1.76 × 10 ⁻³	X ₁₁	3.73 × 10 ⁻⁵	8.63 × 10 ⁻³
X ₂	5.35 × 10 ⁻⁵	4.55 × 10 ⁻³	X ₁₂	1.06 × 10 ⁻⁴	6.73 × 10 ⁻³
X ₃	1.75 × 10 ⁻⁵	7.69 × 10 ⁻³	X ₁₃	5.25 × 10 ⁻⁵	1.35 × 10 ⁻³
X ₄	5.82 × 10 ⁻⁶	5.05 × 10 ⁻²	X ₁₄	3.18 × 10 ⁻⁵	5.66 × 10 ⁻²
X ₅	6.54 × 10 ⁻⁵	6.28 × 10 ⁻³	X ₁₅	6.24 × 10 ⁻⁶	6.25 × 10 ⁻³
X ₆	3.98 × 10 ⁻⁶	3.23 × 10 ⁻²	X ₁₆	1.78 × 10 ⁻⁵	7.34 × 10 ⁻³
X ₇	1.38 × 10 ⁻⁵	5.27 × 10 ⁻³	X ₁₇	2.66 × 10 ⁻⁴	2.27 × 10 ⁻²
X ₈	3.61 × 10 ⁻⁵	7.63 × 10 ⁻²	X ₁₈	3.36 × 10 ⁻⁴	1.28 × 10 ⁻¹
X ₉	2.44 × 10 ⁻⁴	8.23 × 10 ⁻²	X ₁₉	1.74 × 10 ⁻⁵	3.29 × 10 ⁻⁴
X ₁₀	2.21 × 10 ⁻⁴	3.81 × 10 ⁻³	X ₂₀	2.27 × 10 ⁻⁵	4.28 × 10 ⁻³

斯节点进行 HAZOP – LOPA 集成风险分析. 结果见表 5 所示. 未减轻事件频率等于初始事件、条件

事件和后果事件发生频率的乘积. 减轻事件频率等于未减轻事件频率与防护层失效频率的乘积. 由频率等级和后果严重度确定未减轻事件和减轻事件的风险等级.

从表 5 中可以看出, 通过加热炉炉管内壁结焦事件进行 HAZOP – LOPA 风险分析可知, 未减轻事件的频率 4.00×10^{-5} 超过了其风险可接受值 1.00×10^{-5} . 采取炉管表面多点设置热电偶和制定管线破裂相应预案两个独立保护措施后, 事故发生频率 4.00×10^{-5} 降低到了 8.00×10^{-8} , 且风险等级由未减轻事件的 10 级降至减轻事件的 5 级剩余风险. 根据表 3 知风险等级为 5 级时, 应在条件允许时采取安全措施进一步降低风险水平, 建议在加热炉入焦炭塔转油线、大油气线隔断阀采用高温电动球阀, 避免结焦, 直至将剩余风险降到可接受范围为止.

表 5 加热炉炉管内壁结焦 HAZOP – LOPA 集成风险分析
Table 5 Integrative risk analysis of inner wall coking in the heating furnace via HAZOP-LOPA

事故场景描述	后果严重程度	风险可接受		始发事件描述及频率	中间事件描述及频率	后果事件描述及频率
		不可接受值	容许值			
炉管内壁结焦, 增加了管壁传热阻力, 造成管壁温度进一步增加, 使结焦不断增厚, 恶性循环, 严重时腐蚀炉管, 油料泄露而导致加热炉火灾、爆炸事故	5	2.00×10^{-4}	1.00×10^{-5}	炉管表面热强度过高将使靠近管壁处的油品因过热而裂解结焦 5.00×10^{-2}	①未及时处理结焦腐蚀炉管 2.00×10^{-1} ②炉外管线破裂时没有得到相关人员及时处理 1.00×10^{-1}	①炉管破裂造成油料泄露 4.00×10^{-2} ②造成人员伤亡、财产损失 1.00

续表 5								
未减轻事件			独立防护层措施		减轻事件			建议措施
频率	频率等级	风险等级	描述	PDF	频率	频率等级	剩余风险等级	
4.00×10^{-5}	2	10	①炉管表面多点设置热电偶,监测炉管温度,防止局部温度过高	① 1.00×10^{-2}	8.00×10^{-8}	1	5	加热炉入焦炭塔转油线、大油气线隔断阀采用高温电动球阀,避免炉管结焦
			②制定管线破裂相应预案,一旦破裂对应事故加热炉立即熄火	② 2.00×10^{-1}				

3.4 Bow – Tie 分析

对炉管内壁结焦事件进行 HAZOP – LOPA 集成风险分析,在采取两层独立保护层之后,“内壁结焦”这一基本事件造成加热炉火灾、爆炸事故的风险等级虽然有所下降,但是 5 级的剩余风险水

平仍然较高,后果比较严重,超出可接受范围。

以炉管内壁结焦导致加热炉火灾、爆炸事故为例做领结图分析,即 Bow – Tie 分析,辨识出使保护层持续有效的关键活动,进而防止加热炉火灾、爆炸事故的发生,结果见图 5 所示。

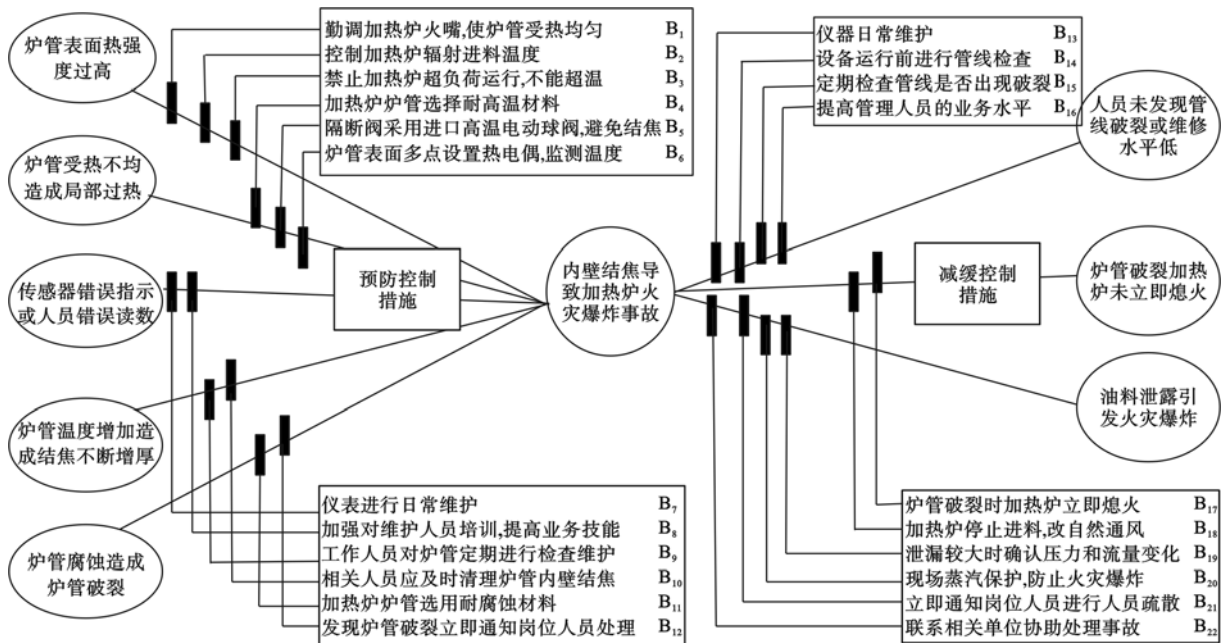


图 5 加热炉炉管内壁结焦事件领结图风险分析结果

Fig. 5 Bow-Tie analysis results of inner wall coking event in the heating furnace

分析图 5 可知,图中左侧部分是由故障树分析得出事故原因,右侧部分是由事件树分析得出事故后果,中间部分为 12 条防止加热炉火灾爆炸发生的预防控制措施和 10 条降低事故后果的减缓控制措施,通过 Bow – Tie 分析,可为进一步降低加热炉火灾爆炸事故的风险提供指导。

4 结 论

1) 本文提出了基于贝叶斯网络(BN)的危险性与可操作性研究(HAZOP)、保护层分析(LOPA)、领结分析(BTA)于一体的复合型工艺风险评估模型。

2) 复合型工艺风险评估模型中,首先将编制完整的系统故障树映射成对应的贝叶斯网络,确定风险贝叶斯故障节点;然后通过 HAZOP – LOPA 集成分析研究该节点中的参数出现偏差的原因及后果,利用独立保护层(IPL)失效概率评估剩余风险等级;最后对剩余风险等级较高的事件进行 Bow – Tie 分析,辨识出使保护层持续有效的关键活动。

3) 以延迟焦化装置为例,对该风险评估模型进行应用,充分验证了其可行性与准确性。

参考文献:

[1] Ren J, Jenkinson I, Wang J. An offshore risk analysis method

- using fuzzy Bayesian network [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2009, 131(4): 1–12.
- [2] Weber P, Medina O G, Simon C, et al. Overview on Bayesian networks applicatins for dependability, risk analysis and maintenance areas[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, 25(4): 671–682.
- [3] Brooker P. Experts, Bayesian belief networks, rare events and aviation risk estimates [J]. *Safety Science*, 2011, 49(8): 1142–1155.
- [4] 周建方,唐椿炎,许智勇. 贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 192–196.
(Zhou Jian-fang, Tang Chun-yan, Xu Zhi-yong. Application of Bayesian networks to dam risk analysis [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(1): 192–196.)
- [5] 汪涛,廖彬超,马昕,等. 基于贝叶斯网络的施工安全风险概率评估方法[J]. 土木工程学报, 2013, 43(增刊1): 385–388.
(Wang Tao, Liao Bin-chao, Ma Xin, et al. Using Bayesian network to develop a probability assessment approach or construction safety risk[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 43(supl): 385–388.)
- [6] Peal J. Fusion, propagation, and structuring in belief works [J]. *Artificial Intelligence*, 1986, 29(3): 241–288.
- [7] Hallowell M R, Gambatese J A. Construction safety risk mitigation [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(12): 1316–1323.
- [8] 许芝瑞,孙文勇,赵东风. HAZOP 和 LOPA 两种安全评价方法的集成研究[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(5): 66–68.
(Xu Zhi-rui, Sun Wen-yong, Zhao Dong-feng. Integrative research on two safety evaluation methods of HAZOP and LOPA[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2011, 18(5): 66–68.)
- [9] CCPS. Layers of protection analysis-simplified process risk assessment[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 2001.
- [10] 李凤英,毕军,曲常胜,等. 环境风险全过程评估与管理模式研究及应用[J]. 中国环境科学, 2010, 30(6): 858–864.
(Li Feng-ying, Bi Jun, Qu Chang-sheng, et al. Whole-precess environmental risk assessment and management and its application[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(6): 858–864.)

(上接第 736 页)

- [3] 刘丽荣,冯兵,李少游,等. 工业地产与城市经济互动发展机理研究[J]. 商业时代, 2009(17): 99–100.
(Liu Li-rong Feng Bing, Li Shao-you, et al. The study of the development and the mechanism of industrial real estate and urban economic interaction [J]. *Commercial Times*, 2009(17): 99–100.)
- [4] Wheaton W C, Torto R G. An investment model of the demand and supply for industrial real estate[J]. *Real Estate Economics*, 1990, 18(4): 530–547.
- [5] Thomas J O. Environmental contamination and industrial real estate prices[J]. *Journal of Real Estate Research*, 2002, 23(1): 179–200.
- [6] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1994.
(Wang Qi-fan. System dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.)
- [7] 陈悦华,廖造壮. 基于系统动力学视角的武汉市商品住宅价格分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 20(33): 9132–9136.
(Chen Yue-hua, Liu Zao-zhuang. Analysis of Wuhan commercial housing price based on system dynamics [J]. *Science and Technology and Engineering*, 2012, 20(33): 9132–9136.)
- [8] Rose L A. Urban land supply: natural and contrived restrictions[J]. *Journal of Urban Economics*, 1989, 25(3): 325–345.
- [9] Williams J T. Real estate development as an option[J]. *The Journal of Real Estate Finance and Economics*, 1991, 4(2): 191–208.